

AZ ELEKTROMÁGNESES HULLÁMOK VIZSGÁLATA HERTZ KÍSÉRLETEI ALAPJÁN

SZABÓ LAJOS

A Föld és minden élőlény állandó kölcsönhatásban van az elektromágneses mezővel. A különböző hullámhosszúságú és intenzitású elektromágneses sugárzás forrása a világűr, a Föld, de maga az emberi test is. E sugárzás formálja az életünket, szervezetünket. Felhasználásával pusztíthatunk, de megkönnyítheti munkánkat, szebbé és boldogabbá teheti napjainkat. Gondoljunk az elektromágneses energia széles körű felhasználására, az elektromos gépek, rádió, televízió, gyógyászat hatására stb. „A meggyorsult tudományos és műszaki fejlődés korszakában az iskolai közismereti tantárgyak oktatásának a gerincét az időtálló ismereteknek, alaptörvényeknek kell alkotniok. Ennek optimálisan kell párosulnia az alkalmazási készség és önálló gondolkodás kifejlesztésével”. [6] A középiskolai oktatásban is nagyobb súlyt kell kapni az elektromágneses mező ismeretének. [7]

A köznapi életben az áthatolhatatlanságot tekintjük az anyag leglényegesebb tulajdonságának. A fizikában az anyag lényeges, elválaszthatatlan tulajdonságát jellemző fizikai mennyiségeknek pedig a tömeget, energiát, impulzust, impulzusmomentumot tartjuk. Ezek az anyag minden fókán szükségszerűen fellépnek. A relativitás elmélete szerint a tömeg és az energia arányosak egymással, s e kettő megmaradását egyetlen független tételben tartjuk számon ($W=mc^2$). Azokat a jelenségeket, amelyekben csak e négyféle tulajdonság játszik szerepet, mechanikai jelenségeknek nevezzük.

A modern fizikai kutatások alapján beszélhetünk akkor is anyagról, amikor az az áthatolhatatlanságnak a nyomát sem mutatja. Ilyen anyag a fizikai mező, melynek önálló fizikai realitása van, és fizikai tulajdonságait a tér mozgástörvényei határozzák meg. (Az anyag más megjelenési formája.) A Maxwell-féle (1865) téregyenletekből matematikailag következett, hogy létezniük kell a vákuumban fénysebességgel terjedő elektromágneses hullámoknak, amelyeknek ugyanazok az alaptulajdonságaik, mint a fénynek. A Maxwell-egyenletek megoldásával megmutatható, hogy a gyorsulással mozgó töltés, vagy töltésrendszer elektromágneses tere a töltéstől távoli tartományban leszakad a töltésről, és hullám formájában kisugárzódik. A legegyszerűbb, egzaktul megoldható példa erre a rezgő elektromos dipólus. Az úgynevezett hullámzónában az elektromos és mágneses térerősség a hullámterjedés irányára merőleges síkban egymásra is merőleges. Az elektromágneses hullám tehát tranzverzális. Sebessége megegyezik a fénysebességgel.

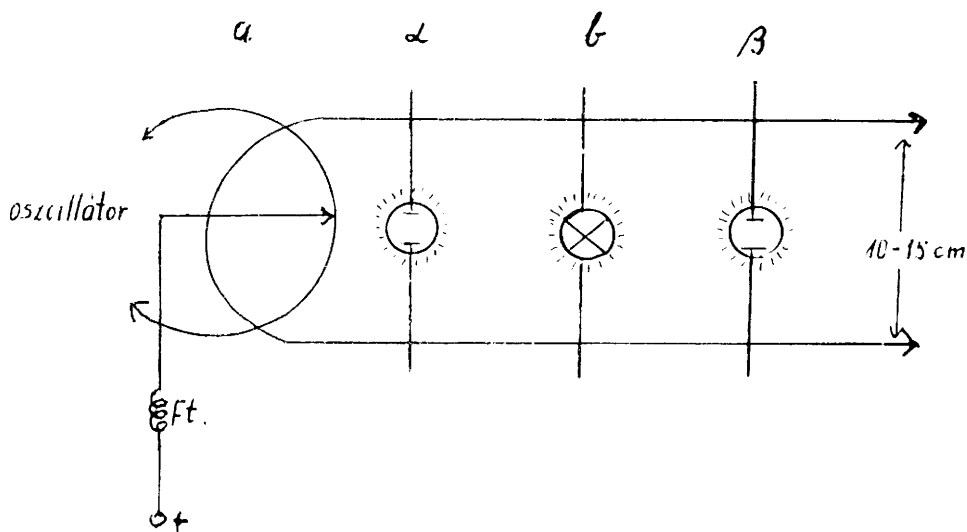
Ez az elmélet adta az indítékot a Hertz-féle kísérletekre (1888). E kísérletek közül legfontosabb az elektromágneses hullámok kimutatása, azok sebessége, visszaverődése, törése, interferenciája, polarizációja. [6]

Az elektromágneses hullám ezen tulajdonságait csak olyan hosszúságú hullámokon tudjuk vizsgálni az iskolákban, ami a tanteremben mérhető. Ezért a hullámhossz 60—100 cm-es legyen. Az adó teljesítménye pedig olyan, hogy a vevő dipóljában egy zsebizzót a terem bármely helyén kigyújtson. Ehhez kb. 15—20 wattos adóra van szükség. Kisebb teljesítményű adó, aminek a hullám tulajdonságait csak műszerrel tudjuk indikálni, nem elég szemléletes a középiskolás tanuló számára. Ennél a környezet elszívó és zavaró reflektáló hatása miatt a mérés pontatlanná válik. Rövidebb hullámhosszak esetében a csomópontok és duzzadóhelyek közel kerülnek, ami szintén a szemlélet rovására megy (2—3 cm-es hullámokat keltő adót készíthetünk Gunn-diódával, amelyekkel szintén szép kísérleteket végezhetünk és méréseink még pontosabbak lehetnek). Az általunk készített adó visszacsatolt, stabilizálatlan, nincs kimeneti szűrője, így nem stabil 320—340 MHz-en sugároz. Az iskolai célra teljesen megfelel. Készítésében az a cél vezetett, hogy:

1. egyszerű, olcsó legyen, amatőr, hazai alkatrészekkel elkészíthesse,
2. az iskolában már meglevő segédberendezésekkel tudjuk működtetni,
3. nagy természet, helyiséget ne igényeljenek a kísérletek.

Elektromágneses hullám terjedési sebességének mérése Lecher-rendszerrel

Az elektromágneses rezgések energiája akár a vezetékek mentén, akár a szabad térben tovaterjedhet. Hogy az elektromágneses tér tovaterjedése miképpen és mekkora sebességgel megy végbe, a vezetékekből, ill. az ezek mentén fellépő jelenségekkel vizsgálhatjuk. Igen nagy frekvencia esetén a kvázistacionárius állapot már aránylag kis méretű vezetékekben sem valósul meg, és ebből a terjedés véges sebességére kell következtetnünk. Ha nagyfrekvenciás oszcillátorunk anódkörét két párhuzamos drótból álló kettős vezeték (Lecher-drótpár) zárt végéhez induktíve csatlakoztatjuk, akkor a rezgést a drótpár közötti térben vizsgálhatjuk (1. ábra). Ha a drótpár távolabbi végét megfelelő helyen rövidre zárjuk és vizsgáljuk a feszültség és árameloszlás jelenségeit, teljesen hasonló jelenséget tapasztalunk, mint a kötélhullámoknál, a húrnál, a Kund-csónél. Tehát a drótpár mentén elektromágneses állóhullámok alakulnak ki. Ennek megfelelően változik a hellyel és idővel a feszültség, az áramerősség, továbbá az elektromos és mágneses térerősség is. Ennek oka a vezeték mentén végigfutó és időben változó elektromágneses tér véges terjedési sebességében keresendő. Elektromágneses haladó hullámok jönnek létre. Ha a drótpár két átellenes szakasza közötti térrészben az elektromos tér igen gyorsan változik, akkor ez mint eltolási áram maga körül mágneses teret kelt. Az időben változó mágneses tér viszont újabb elektromos teret hoz létre stb. (Maxwell-elmélet) és \vec{S} teljesítménysűrűségű elektromágneses haladó hullámként terjed tovább. A drótpár tehát csak vezeti az elektromágneses hullámokat, de a hullámterjedés a vezetékek közötti térben történik. Meghatározható az elektromágneses hullám terjedési sebessége, ha ismerjük az oszcillátor frekvenciáját és megmérjük a kisugárzott elektromágneses hullám hosszát (két szomszédos csomópont, vagy duzzadóhely távolsága a hullámhossz fele). Ekkor az elektromágneses hullám terjedési sebessége: $c=f\lambda$.



1. ábra

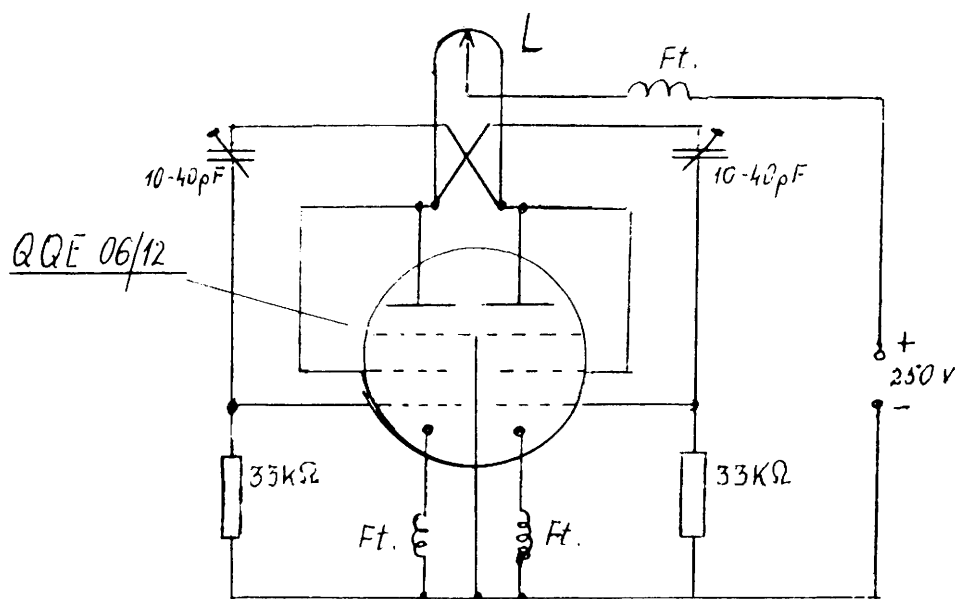
A 2. ábra alapján szerelőlapra összeállított oszcillátort fogjuk állványba. Az oszcillátor ikerpentóda, amely ellenütemű önrezgéskapcsolásban van. A hajlított L anódlaprezgőkör egyik része mint anódkör, a másik az ellenrácskör tekercseként működik. A rácslevezető ellenállás $33\text{ k}\Omega$. A katód- és az anódvezetékbe 8—10 menetes fojtótekercset teszünk, hogy a nagyfrekvenciás rezgések ne tudjanak a rezgőkörből eltávozni. Bekapcsolás után nagyfrekvenciás rezgés keletkezik, amelyről úgy győződünk meg, hogy az L tekercssel párhuzamosan egy menetű körvezetékbe kapcsolt zsebizzó a nagy indukáló hatásra erősen világít. Az L lapra tengelyirányba helyezett frekvenciamérővel a frekvencia mérhető.

Az oszcillátornak L anódköri lapjához inductíve csatlakoztassunk két egymástól 10—15 cm-re falpra kifeszített 2,5 m hosszú drótpár hurkot. A drótpár másik végét kb. 2,4 m távolságban rövid vezetékkel zárjuk rövide. Vizsgáljuk meg a vezeték mentén az áramerősséget.

Áramerősség kimutatására zseblámpaizzót használunk, melynek két kivezetéséhez kb. 10 cm hosszú egyenes csupasz rézdrótot kapcsolunk. Feszültségjelzéshez ugyanígy felszerelve kisfeszültségű glimmlámpa szolgál. A lámpák két kivezetését helyezük keresztbe a Lecher-drótpáron úgy, hogy azok a vezetékekkel érintkezzenek (1. ábra).

Jegyezzük meg mindegyik jelzőlámpa felvillanási helyét. A zsebizzó felvillanásai az áramerősség, a glimmlámpa felgyulladás a feszültségmaximumot jelzik. A két maximum közötti távolság a hullámhossz fele. A hullámhossz tehát mérhető.

Ha az L anódköri laphoz inductíve csatlakoztatunk egy $\frac{\lambda}{2}$ hosszúságú dipólt, (nyílt rezgőkör), az elektromágneses energiát kisugározhatjuk. Tőle 1—2 m távolságban a szintén $\frac{\lambda}{2}$ méretű vevődipól középebe helyezett 3,5 voltos kis égő világít, jelezve, hogy rezonancia (vétel) van.



2. ábra

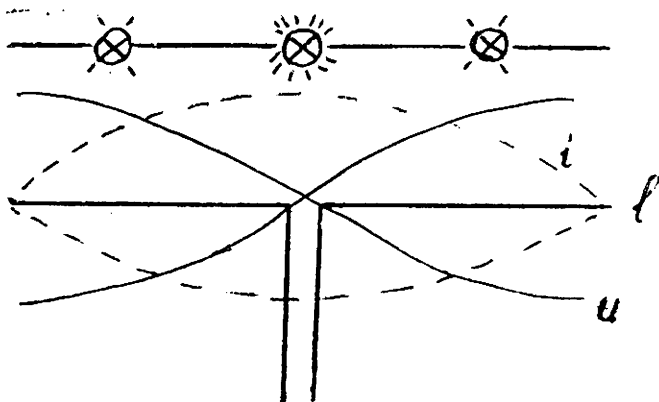
Megjegyzés:

Először az oszcillátorcső fűtésének adjunk 6,3 V feszültséget, csak azután adjunk anódfeszültséget.

Hertz kísérletei URH-val

Nyitott rezgőkörnél az elektromos erővonalak messze a térbe haladnak, ott ez az időben váltakozó elektromos erőter — az eltolási áram — mágneses örvényteret kelt, és így energiájának egy részét a rezgőkör hullámok formájában kisugározza. A dipólus saját rezgéseinek vizsgálása céljából a Lecher-dótpár aa szakaszának $\frac{l}{4}$ hosszúságú részét egyenesítjük ki $l = \frac{\lambda}{2}$ hosszúságú dipólussá. Ennek a dipólusnak a közepére nagyfrekvenciás oszcillátorból viszünk energiát. E rezgő dipól közelében vele párhuzamosan kis izzókkal ellátott l hosszúságú vezetőt helyezünk, a középső lámpa világít legjobban: a drótban folyó, nem kvázistacionárius áram erősségének a drót közepén duzzadóhelye, két végén csomópontja van, a feszültségnek pedig a közepén van csomópontja és a két végén duzzadóhelye. A dipólus-oszcillátor a térbe szabad elektromágneses hullámokat bocsát ki (3. ábra). [5]

A rezgések, ill. hullámok kimutatására hasonló méretű, rezonanciára beállított dipólus szolgál. Az elektromágneses hullámok is rendelkeznek a fényhullám alapvető tulajdonságaival (visszaverődés, törés, interferencia, elhajlás, polarizá-



3. ábra

ció), Maxwell elmélete értelmében az E_r relatív permittivitású és $\mu_r \approx 1$ relatív permeabilitású szigetelőben a hullámok $C' = \frac{C}{\sqrt{E_r \mu_r}} \approx \frac{C}{\sqrt{E_r}}$ sebességgel terjednek, az $n = \frac{C}{C'}$ törésmutatóra pedig fennáll az ún. Maxwell-féle reláció:

$$n = \sqrt{E_r}$$

A víznél $E_r \approx 81$, így törésmutatója kb. 1 m-es hullámokra $n \approx 9$. A $c' = f \cdot \lambda'$ összefüggés alapján az erre a közegre vonatkozó a vákuumbelinél $\sqrt{E_r}$ -szor kisebb hullámhosszú, ill. sebesség írható. Pl. a vízben egy $\frac{1}{9}$ hosszúságú dipólus rezeg ugyanakkora frekvenciával, mint a levegőben egy l hosszúságú dipólus. [1]

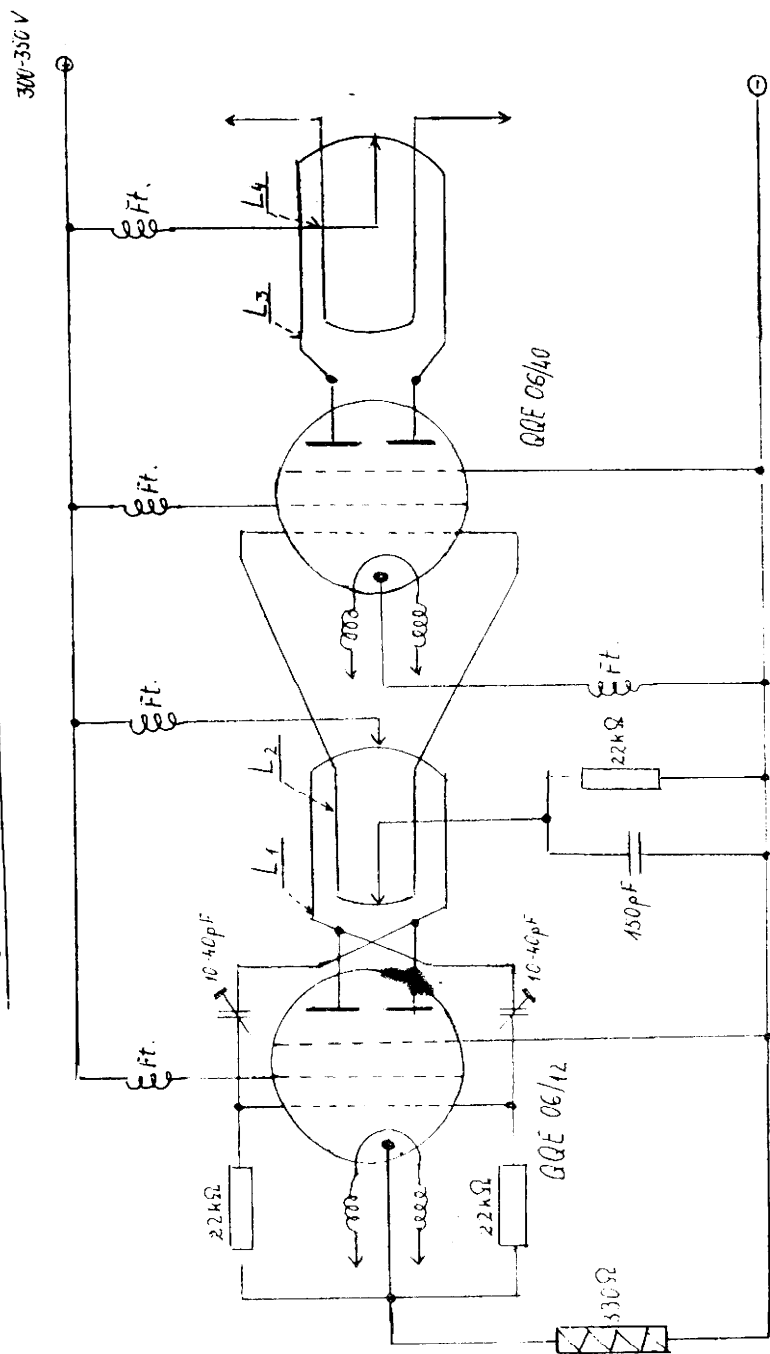
Nagyfrekvenciás oszcillátorunk most is QQE 06/12 elektroncső egy QQE 06/40 erősítőcsővel ellátva (4. ábra). Ehhez csatlakoztatjuk az állványra szerelt dipólt. Ez az adó (A), amely most direktorokat és reflektorokat is tartalmaz. Először a fűtőfeszültséget kapcsoljuk be, majd 1 perc múlva adjuk rá az anódfeszültséget. Dipólunk azonnal sugároz.

A vevő (V) az adó dipóljával egyenlő méretű, középen kis zsebizzóval, szintén direktort és reflektort is tartalmaz. Helyezzük el a vevőt 6—8 m távolságban úgy, hogy dipólja az adó dipóljával egy síkba legyen.

Változtassuk meg a (V) dipól méretét, amíg a közepébe helyezett izzó a legfényesebben világít.

Az adó dipólhosszával megegyező hosszúságú vezető közepében zsebizzó a rezonátorunk (R). Ez nyéllel ellátott dipól.

Az URH adó kapcsolási rajza



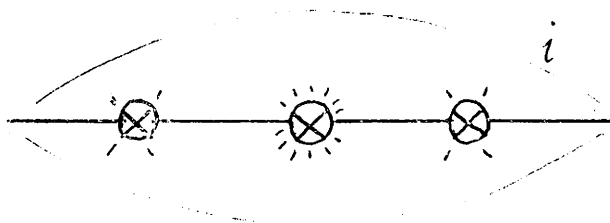
4. abra

Hertz-féle hullámok tulajdonságainak vizsgálata

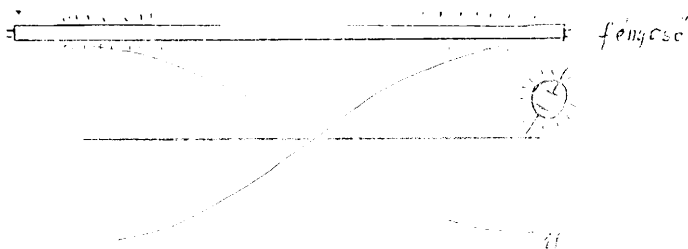
Az oszcillátor rezgéseit ajánlatos hullámirányító dipóllal kisugározni és felfogni. A direktorok és refraktorok segítségével az irányító hatás fokozódik, bár ezek nélkül is alkalmazható.

Kísérletek:

1. Az adó anódkörének vagy a dipóljának közelében elhelyezett fénycső világít (nagy indukáló hatás).
2. Az áram- és feszültségviszonyok kimutatása az adó dipóljain. A dipól közelében elhelyezett $l = \frac{\lambda}{2}$ hosszúságú izzólámpákkal ellátott drótban a középső lámpa erősen, a szélsők gyöngébben világítanak. Az áramerősségnek közepén van duzzadóhelye.



Glimmlámpával vizsgálva az adó dipólját, a végeken izzik, középen kialszik. A feszültség duzzadóhelye a dipól végein van.

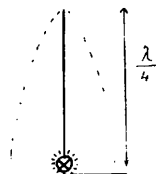


3. A 8—10 m távol elhelyezett vevő dipóljának középjébe tett izzó kigyullad, ha a vevő dipóljának mérete megegyezik az adó dipóljával.
4. A fémlap előtt álló hullámok alakulnak ki. A vevő dipóljába helyezett kis izzó $\frac{\lambda}{2}$ (nálunk 46 cm) távolságokban kigyullad.

Interferencia

5. A fémlap mögött vétel nincs.
6. A bakelitlap a sugárzást átengedi.
7. Hullámok visszaverődése fémlapról. Pontosan bemérhető a vevő izzójának kigyulladásával, hogy a beesési szög egyenlő a visszaverődési szöggel. Grafikonon is felvehető ez.

8. Hullámok polarizációja és transzverzalításának bemutatására a vevő dipólját az adó dipóljához képest elforgatjuk.
9. Hertz-féle rács forgatásának hatására a vevő dipóljában megfelelő energia indukálódik.
10. Diffrakció.
11. $l = \frac{\lambda}{4}$ hullámhosszú antenna segítségével a hullámok kétféle terjedési



módja is szemléltethető. Felületi hullám formájában az antenna izzója az adótól csak 2—3 méterre világít. Ha fémlapot helyezünk el az adó dipólja és az antenna közötti távolság felében fönt (ionoszféra), a térhullámok alakjában terjedő hullám távolabb is energiát juttat az antennába.

12. Dielektrikum szerepének kimutatására a vízben levő 9-szer kisebb (kb. 5 cm) nagyságú dipól középebe helyezett izzó világít.

Az URH-adó szerkezeti felépítése

(A technikai problémák megoldásában nyújtott segítséget köszönöm Kulcsár János elektrotechnikusnak.)

Ismeretes, hogy elektroncsövekkel hagyományos módon ilyen magas (300 MHz) frekvenciát előállítani nem lehet. A szerelésnél figyelembe kell vennünk a beépítendő anyagok minőségét, a csatlások által létrejött kapacitásokat, a gerjedési veszélyt. A dm-es hullámok tartományában igen fontos szerepet játszanak a csövek önkapacitásai és az alkatrészek impedanciája. Ezek kihasználása miatt ellenütemű oszcillátor kapcsolást alkalmaztunk, olyan rádiócsövekkel, amelyeknél egy búrában szimmetrikusan vannak elhelyezve az elektródák.

A vezetékeknek jelentékeny impedanciájuk a csőkapacitásokkal együtt rezonanciaköröket létesítenek. Ezek energia- és frekvenciavesztést okozhatnak. A megfelelő helyeken ennek elkerülésére fojtótekercecseket (Ft) kell alkalmazunk. Így pl. a fűtő elektródákat is illesztett induktív tagokon, fojtókon keresztül tápláljuk. (Ezek nálunk zománc szigetelésű vörösréz vezetékekből készültek.) A fojtókat közvetlenül a csövek elektródjaira, vagy az alkatelemek „meleg” pontjaira kötjük.

A készülékünk oszcillátora ellenütemű, öngerjesztéses QQE 06/12 típusú elektroncsővel készült. Frekvenciája 320—340 MHz. Ez induktíve csatlakozik a szintén ellenütemű QQE 06/40 típusú teljesítményerősítőhöz.

Az induktív csatlakozásnál figyelembe kell vennünk a vezérléshez szükséges meghajtóenergiát és a csatloló rezgőköröket. [2]

A készülék 15×19×26 cm-es fémdobozba szerelt.

Az ITG iskolai tápegység átalakított anódpótlója az áramforrásunk. Ebben az AZ 21 típusú elektroncső helyett 2 db SIEK—7-es szilíciumdiódát építettünk be. Így ez terhelhető 0,5 A-ig. A csövek fűtéséhez 6,3 V, 2,5 V, az anódfeszültséghez 300—350 V és 300 mA szükséges.

Alkatrészjegyzék

QQE 06/12 elektroncső

QQE 06/40 elektroncső

10 db fojtótekerics (fűtésekhez is)

1 db 330 Ω -os 6 W-os huzalellenállás

3 db 22 k Ω -os 0,5 W-os rétegellenállás

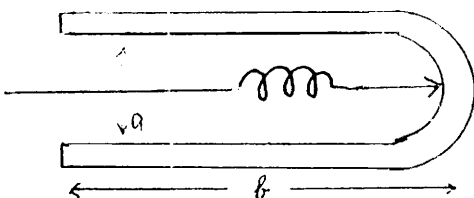
2 db 0—15 pF trimmer kondenzátor

2 db 0—10 trimmer kondenzátor

1 db 150 pF kondenzátor.

Rezgőköri adatok

1. Az oszcillátor rezgőköri adatai

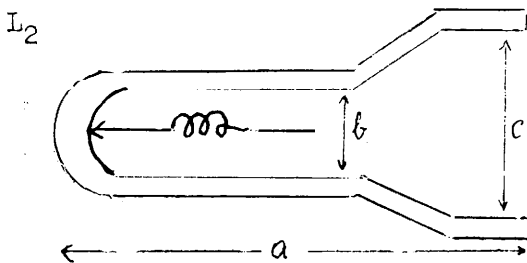


\varnothing 3,5 mm vörösréz huzal

a=25 mm

b=40 mm

2. Induktív csatolótekerics a végfokozat rácsaira



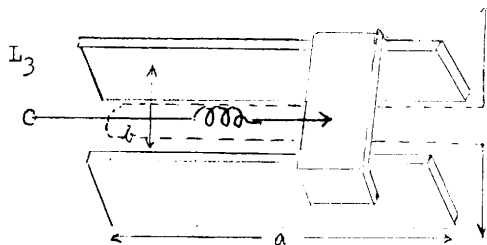
\varnothing 3,5 mm vörösréz huzal

a=65 mm

b=25 mm

c=45 mm

3. Végfokozat anódköri rezgőköre

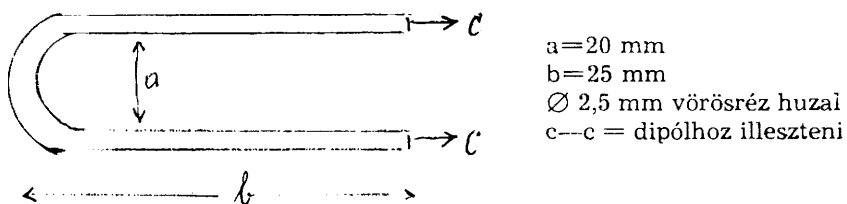


2×10 mm-es vörösréz lap

a=70 mm

b=30 mm

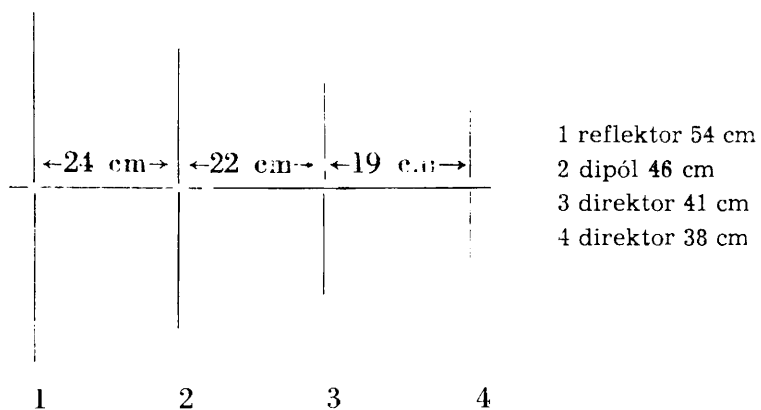
4. Kicsatoló rezgőkör a végfokozat anódkörétől



5. Induktív fojtótekercsek

$\lambda/4 = \text{fojtótekercs hossza (20—25 cm)}$
 $\varnothing 0,7\text{—}1 \text{ mm-es}$ vörösréz huzal zománc szigetelésű
 $\varnothing 8 \text{ mm-es}$ hengeres alakú, kb 10—15 menet.

6. Antenna mérete



IRODALOMJEGYZÉK

1. Budó Agoston: Kísérleti fizika II. Tankönyvkiadó, Budapest, 1968. 353—359. old.
2. Emmer János: Ultrarövid hullámokon. Rádiótechnika, 11. sz. 1954. 262. old.
3. Faragó—Mertz: Gyakorlati elektromosságtan. Műszaki Kiadó, Budapest, 1963. 229—268. old.
4. Istvánffy Ervin: Mikrohullámok technikája és rádiólokátorok, Műszaki Kiadó, Budapest, 1962. 286—297. old.
5. Dr. Litz József: Elektromosságtan II. tanárképző főiskolák számára, Tankönyvkiadó, Budapest, 1975. 360—362. old.
6. Nagy Károly: Az elektromágneses tér alaptörvényei. Fizikai Szemle 1981/1. 19. oldal.
7. Tölgyessy—Kenda: Éltető és pusztító sugárzások. Gondolat Kiadó, Budapest. 1980. 16. old.

EXAMINATION OF ELECTROMAGNETIC WAVES ON THE BASIS OF HERTZ'S EXPERIMENTS

The Earth and all her living creatures and the Universe as well, are in a constant interaction with the electromagnetic field. This radiation is forming our life and organism. The present-day scientific technical revolution is mainly characterized by fusing of the sciences dealing with living nature and the physico-technical sciences, and so they become mutually more productive.

Demonstration of a few features of the electromagnetic space is indispensable in teaching at schools.

We can examine the Lecher wire-waves with a one electric valve VHF radio transmitter, and as for the Hertz-waves, we can investigate them with a two-valve simple VHF radio. This paper is trying to give help to teacher of physics in this field.